

Etude expérimentale de la dispersion dans un milieu à double porosité en condition saturée et insaturée.

Tien Dung Tran Ngoc¹, Jolanta Lewandowska² & Henri Bertin³

¹Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), UMR 5564, CNRS, UJF, INPG, IRD, BP 53, Grenoble cedex 09, France. E-mail: tien-dung.tran-ngoc@hmg.inpg.fr

²Laboratoire Sols Solides Structures, Risques (3S-R), UMR 5521, CNRS, UJF, INPG, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France. E-mail: jolanta.lewandowska@hmg.inpg.fr

³Laboratoire TRansferts, Ecoulements, FLuides, Energétiques (TREFLE), UMR CNRS 8508, Université de Bordeaux, 33405 Talence cedex, France. Email : henri.bertin@bordeaux.ensam.fr

Résumé :

Les milieux poreux naturels forment souvent des structures hétérogènes, qui dans le cas où il existe un fort contraste entre les tailles caractéristiques des pores, sont appelés « milieu à double porosité ». On observe alors le transport préférentiel dans les macropores avec des interactions/échanges avec les micropores qui contribuent à la propagation des solutés dans les conditions de non équilibre local. Dans cette étude, une campagne d'expériences 1D de la dispersion du traceur NaCl en échelon est réalisée en conditions d'écoulement saturé et insaturé sur trois milieux : sable, argile solidifiée et sol à double porosité, formé de billes d'argile arrangées périodiquement dans la matrice de sable. Les courbes de percée dans le milieu à simple porosité et à double porosité sont comparées pour mettre en évidence le comportement non Fickien, en fonction du degré de saturation.

Abstract :

Natural soils are heterogeneous formations which can be named "double porosity" structures, when having a strong contrast between characteristic pore sizes. In such cases we can observe preferential transport in the macropores with interactions/exchanges with the micropores. These interactions/exchanges contribute to solute spreading in the local non equilibrium conditions. A series of 1D stepwise dispersion experiments using NaCl as a tracer were conducted in the saturated and unsaturated conditions. For the comparative purposes, three media were investigated: sand, sintered clay and double porosity medium composed of sintered clayey spheres embedded periodically in the sandy matrix. The breakthrough curves in the simple and double porosity media are compared in order to highlight the non Fickian behaviour as a function of the saturation degree.

Mots-clefs :

Milieu à double porosité ; non saturé ; dispersion non Fickienne.

1 Introduction

Le comportement non Fickien, i.e. une arrivée prématurée de la concentration et un effet de traînée observés dans la courbe de percée, demeure toujours un sujet de recherche d'actualité. Nous observons ce comportement lorsque le soluté est transporté dans un milieu hétérogène saturé (e.g. Delay *et al.*, 1997 ; Berkowitz *et al.*, 2000) ou non saturé (e.g. Kätterer *et al.*, 2001 ; Haws *et al.*, 2004) ou bien dans un milieu homogène dont la teneur en eau est non uniforme (voir Padilla *et al.*, 1999 ; Nützmann *et al.*, 2002).

Nous avons réalisé des expériences de dispersion d'un traceur (NaCl) dans des milieux à simple porosité (SP) (sable et argile solidifiée) et dans un milieu à double porosité (DP) en condition saturée et insaturée pour différentes valeurs du débit d'écoulement d'eau (ou de la solution). Le milieu à double porosité est un modèle physique dont la microstructure est composée de sable et de sphères d'argile poreuse solidifiée par traitement thermique, arrangées de manière périodique. Les propriétés de transport de ces deux matériaux sont suffisamment contrastées pour pouvoir observer des effets de « double structure ». Les résultats expérimentaux nous permettent non seulement de mettre en évidence le caractère non Fickien du transport dans un milieu à double porosité, mais aussi d'identifier la différence entre le comportement dispersif dans les milieux homogène et hétérogène en fonction du degré de saturation.

2 Expériences

2.1 Milieu à double porosité

Les matériaux qui constituent le milieu à double porosité sont le sable d'Hostun HN 38 et des billes d'argile poreuse. Les propriétés physiques et hydrauliques de ces deux matériaux ont été présentées dans Lewandowska *et al.* (2005 et 2006). La distribution des grains de sable est relativement uniforme. Sa composition chimique est principalement du quartz et le diamètre moyen des grains est de 162 μm . Les billes d'argile ont un diamètre moyen de 6,4 mm, l'analyse porosimétrique par mercure a montré que la taille moyenne de pores est de l'ordre de 0,7 μm . Les billes d'argile sont arrangées de manière périodique dans la matrice de sable pour former un milieu à double porosité. Le rapport de la taille de la période sur la longueur totale du milieu à double porosité est de 1/50.

2.2 Dispositif expérimental

Les expériences sur le sable et sur le milieu à double porosité sont réalisées dans des colonnes en plexiglas, dont la longueur totale est de 60 cm (50 cm de longueur utile) et de diamètre interne 6 cm. La caractérisation de l'argile solidifiée est effectuée sur un cylindre dont la longueur et le diamètre sont de 25,9 cm et 5,25 cm respectivement. Le cylindre est enveloppé par une membrane en caoutchouc et de résines pour assurer l'étanchéité. La teneur en eau est mesurée par la technique d'atténuation d'un rayonnement γ (Lewandowska *et al.*, 2006). L'écoulement est contrôlé par le débit d'entrée (pompe à pistons) et par le débit de sortie (balance). Un sel (NaCl, concentration de 5 g/l et 20 g/l) est utilisé comme traceur. La concentration dans l'effluent est mesurée toutes les 300 s par densimétrie. Les expériences ont été réalisées en conditions isothermes ($\Delta T_{\text{max}} = 1,9^\circ\text{C}$) et forte saturation en eau (0,73 – 1).

2.3 Procédure expérimentale

Les expériences se déroulent en trois étapes : i) préparation du milieux poreux; ii) mise en place de l'écoulement saturé ou insaturé ; iii) test de dispersion du traceur. Les paramètres expérimentaux sont présentés dans les Tables 1 et 2. Pour ce qui concerne le milieu saturé (Tests 1-3), on injecte plusieurs volumes de pores de CO_2 dans le milieu initialement sec. Ensuite, la colonne est alimentée en solution de NaCl par le bas. Pour le milieu insaturé, l'eau pure ou la solution (selon l'expérience de dispersion envisagée (voir Table 2)) est injectée par le bas de la colonne, jusqu'à obtention d'un écoulement stationnaire. Dans les cas des Tests 8 et 9, l'écoulement permanent insaturé a été obtenu différemment par rapport aux Tests 4-7 : Les milieux saturés en eau sont d'abord drainés en imposant une succion de -85 cm en bas de la colonne. Ils sont ensuite alimentés en solution en haut de la colonne jusqu'à obtenir un

écoulement permanent. Les expériences de transport de NaCl (échelon de concentration) débutent en tournant la vanne pour changer le milieu déplaçant (solution ou eau pure), par le bas de la colonne pour les Tests 1-7 et par le haut de la colonne pour les Tests 8 et 9.

Table 1 : Caractéristiques des milieux poreux.

Test	Milieu	Longueur L [cm]	Diamètre [cm]	w_1 [-]	w_2 [-]	n_1 [-]	n_2 [-]	S [-]
Condition saturée								
1	Sable	50,1	6			0,399		1
2	DP	50,3	6	0,483	0,517	0,386	0,343	1
3	Argile	25,9	5,25				0,343	1
Condition non saturée								
4	Sable	50,3	6			0,404		0,86
5	Sable	50,2	6			0,400		0,87
6	DP	51,0	6	0,490	0,510	0,378	0,343	0,88
7	DP	46,9	6	0,483	0,517	0,386	0,343	
8	Sable	50,2	6			0,400		0,73
9	DP	51,0	6	0,490	0,510	0,378	0,343	0,82

Table 2 : Conditions expérimentales.

Test	Milieu	Concentration C (t < 0) [g/l]	Concentration C (t ≥ 0) [g/l]	Vitesse de Darcy q [cm/s]	Température T [°C]	Pe _l
Condition saturée						
1	Sable	20	z = L, C = 0	$5,90 \times 10^{-4}$	19,9-19,3	7,7
2	DP	20	z = L, C = 0	$5,90 \times 10^{-4}$	19,1-19,5	7,9
3	Argile	20	z = L, C = 0	$1,28 \times 10^{-4}$	24,5-24,7	0,01
Condition non saturée						
4	Sable	0	z = L, C = 5	$3,44 \times 10^{-4}$	20,4-21,5	4,9
5	Sable	0	z = L, C = 5	$3,44 \times 10^{-4}$	20,9-22,8	5,0
6	DP	0	z = L, C = 5	$3,44 \times 10^{-4}$	20,5-22,2	5,0
7	DP	0	z = L, C = 5	$3,44 \times 10^{-4}$	20,2-20,4	5,0
8	Sable	5	z = 0, C = 0	$3,44 \times 10^{-4}$	22,6-23,2	11,7
9	DP	5	z = 0, C = 0	$3,44 \times 10^{-4}$	19,9-20,3	11,7

w_1 et w_2 : fraction volumique du sable et de l'argile; n_1 : porosité du sable mesurée par gravimétrie; n_2 : porosité de l'argile mesurée par gammamétrie; S : degré de saturation, $S = \theta / n$; θ : teneur en eau moyenne mesurée par gammamétrie; n : porosité moyenne, $n = w_1 n_1 + w_2 n_2$; Pe_l : nombre de Péclet local (sable).

3 Résultats et discussion

Dans le but de comparer les courbes de percée obtenues dans les différentes conditions, nous avons tracé l'évolution de la concentration relative en fonction du rapport V/V_p (V est le volume d'eau ou de solution injecté et V_p est le volume des pores). La relation entre la densité et la concentration dans les effluents s'avère linéaire dans la gamme de la concentration et température des expériences. La concentration relative est donc calculée comme : $C/C_0 = (\rho(t) - \rho_{\min}) / (\rho_{\max} - \rho_{\min})$, où $\rho(t)$, ρ_{\min} et ρ_{\max} sont la densité mesurée, la densité minimale et la densité maximale respectivement, C_0 est la concentration de référence. Notons que ces valeurs sont moyennées par lissage des valeurs brutes à l'aide du logiciel Table Curve 2D 5.01.

Le bilan de masse (en NaCl) est effectué en utilisant les courbes de percée C/C_0 . La différence entre les masses entrée/sortie et la masse présente dans le milieu est de l'ordre de 3% (sauf pour le Test 6 : 9,6 %).

3.1 Comparaison des comportements des milieux homogène et hétérogène

3.1.1 Milieux poreux saturés

La Figure 1a montre la distribution de la teneur en eau mesurée par gammamétrie dans trois matériaux : sable (Test 1), double porosité (Test 2) et argile (Test 3). Le profil de la teneur en eau du milieu à double porosité est plus dispersé que celui du sable à cause de la présence d'un système de pores secondaire. Le résultat pour le Test 3_B-B nous montre l'existence d'une hétérogénéité locale dans le cylindre argileux qui se manifeste par différents profils de la teneur en eau selon la direction de mesure et la présence de pics de teneur en eau. La Figure 1b présente les courbes de percée obtenues dans trois matériaux. La saturation complète des milieux sable et argile est confirmée par le rapport $C/C_0 = 0,5$ obtenu à $V/V_p = 1$. Les courbes de percée du sable (Test 1) et de l'argile (Test 3) sont symétriques. La courbe de percée du milieu à double porosité (Test 2) est non Fickienne. La présence des inclusions est responsable d'une part de la diminution rapide de la concentration aux temps courts et d'autre part de l'effet de retard aux temps longs (effet de traînée à plus de $2,5 V_p$).

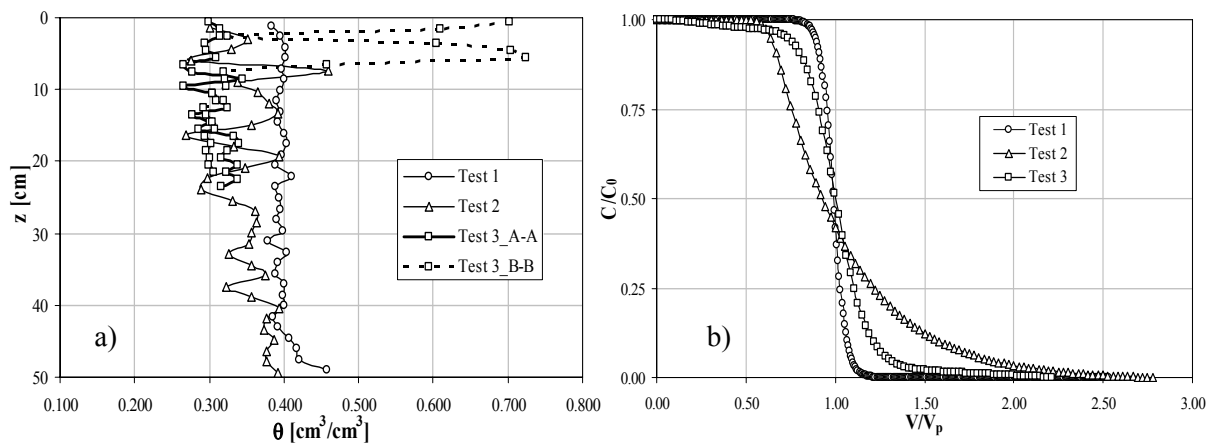


FIG.1 – a) Profil de la teneur en eau à saturation (A-A : mesure le long d'une côté d'échantillon ; B-B : côté perpendiculaire à A-A) ; b) Courbes de percée de trois types de milieux saturés : sable (Test 1), milieu à double porosité (Test 2) et argile solidifiée (Test 3).

3.1.2 Milieux poreux non saturés

Nous considérons la mesure de la teneur en eau et du flux à la sortie comme critères globaux de l'écoulement permanent insaturé. Nous observons que le flux mesuré à la sortie est légèrement plus faible que celui d'entrée du fait de la sortie d'air du milieu. Les teneurs en eau mesurées avant et après le test de dispersion confirment cette légère différence (max 5%). La Figure 2a présente les profils de teneur en eau après le test de dispersion. Les courbes de percée sont présentées Figure 2b. Le comportement du sable (Tests 4 et 5) correspond à la condition non saturée : $C/C_0 = 0,5$ obtenu à $V/V_p < 1$ (FIG. 2b). Dans la même condition d'écoulement, les courbes de percée du milieu à double porosité (Tests 6 et 7) donnent une arrivée de concentration plus rapide (à $V/V_p < 0,5$) et une traînée de concentration aux temps longs. Comme dans le cas du milieu saturé, le milieu à double porosité présente un comportement non Fickien.

3.2 Comparaison des comportements en fonction de la teneur en eau

3.2.1 Milieu homogène : sable

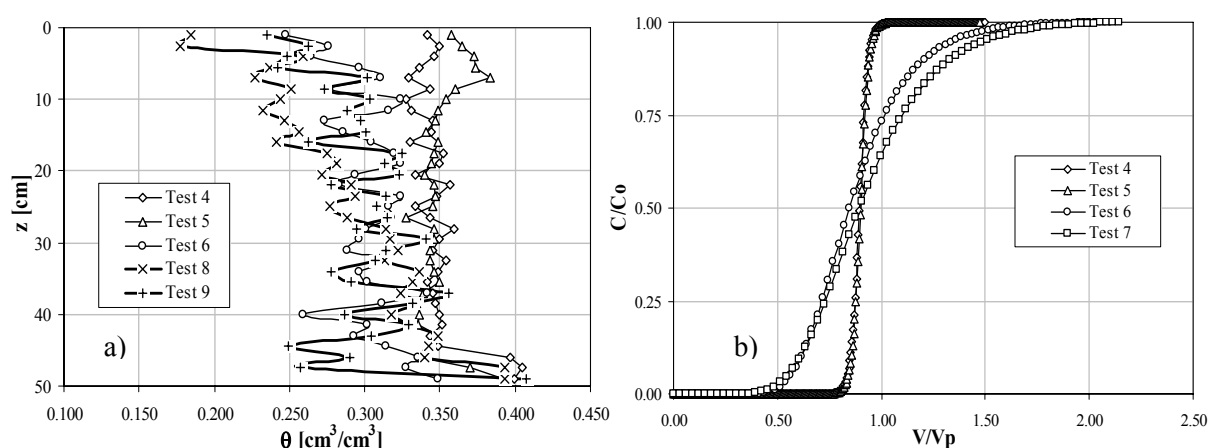


FIG.2 – a) Profil de teneur en eau après le test de dispersion du sable (Tests 4, 5 et 8) et du milieu à double porosité (Tests 6 et 9) ; b) Courbes de percée du sable (Tests 4 et 5) et du milieu à double porosité (tests 6 et 7).

La Figure 3a présente les courbes de percée obtenues pour le sable dans les conditions saturées et insaturées. La comparaison entre les Tests 1, 4 et 5 montre que la dispersivité en condition insaturé est légèrement plus faible que dans la condition saturée (profil plus raide). Ce résultat est en contradiction avec les résultats de Padilla *et al.* (1999) et Nützmann *et al.* (2002). Cependant, le Test 8 en condition insaturé présente une dispersivité plus importante, accompagnée d'un comportement non Fickien. Nous supposons donc que ce comportement résulte de la distribution non uniforme de la teneur en eau qui devient d'autant plus significative que le milieu est moins saturé (influence sur la connexité de la phase liquide) (FIG. 2a).

3.2.2 Milieu hétérogène à double porosité

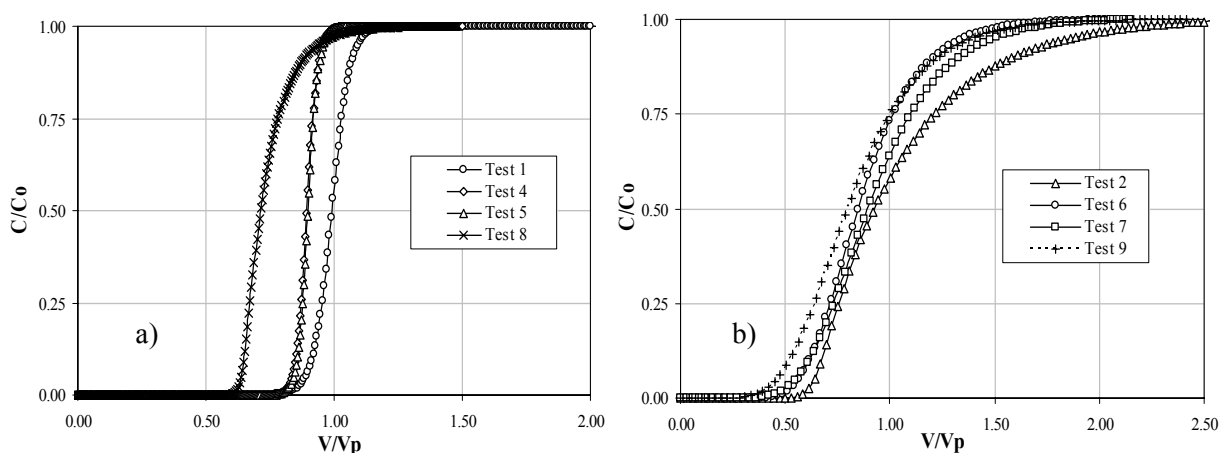


FIG.3 – Différents comportements de la dispersion dans les milieux saturé et insaturé : a) sable : condition saturée (Test 1) et insaturée (Tests 4, 5 et 8) ; b) milieu à double porosité : condition saturée (Test 2) et insaturée (Tests 6, 7 et 9).

La Figure 3b présente une comparaison entre les courbes de percée obtenues pour le milieu à double porosité. Pour rendre possible la comparaison entre les tests réalisés dans des conditions opposées (« pollution » ou « dépollution »), pour les Tests 2 et 9 nous avons tracé les

valeurs $(1 - C/C_0)$. Cette transformation semble délicate pour le milieu à double porosité et peut introduire des erreurs d'interprétation. Nous remarquons que le phénomène de dispersion dans le milieu à double porosité est non Fickien indépendamment du degré de saturation : les courbes de percée sont asymétriques, avec une arrivée prématurée et un effet de traînée. On peut observer deux types de comportement, aux temps courts et aux temps longs, en fonction de la teneur en eau. Le soluté sort (légèrement) plus vite du milieu moins saturé en eau. Aux temps longs la durée de la traînée est d'autant plus longue que le milieu est plus saturé. Ce dernier effet est très marqué dans les courbes de percée. Notons enfin que dans le milieu à double porosité la distribution de la teneur en eau est très hétérogène (FIG. 2a). Ceci peut avoir un effet important sur le transport de soluté dans un milieu à double porosité et non saturé.

4 Conclusions

L'analyse qualitative des résultats des expériences de dispersion montre le comportement non Fickien du milieu à double porosité, dans les conditions saturées et non saturées. Dans les conditions saturées on observe dans le milieu à double porosité un léger retard de l'apparition du soluté et un effet de traînée plus longue que dans les conditions non saturées. La diminution de la teneur en eau semble donc présenter un effet accélérateur par rapport au cas saturé. Néanmoins, ce comportement peut être fortement affecté par la distribution hétérogène de la teneur en eau qui a été mise en évidence grâce à la technique de gammamétrie. Le comportement non Fickien a été également observé dans le milieu à simple porosité. Dans ce cas, l'origine est associée à la distribution non uniforme de la teneur en eau.

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du Programme ECCO-PNRH, INSU/CNRS France (actuellement GDR « Hydrodynamique et Transferts dans les Hydrosystèmes Souterrains »). Nous tenons à remercier le CNRS pour la bourse BDI-PED accordée à T. D. Tran Ngoc.

Références

- Berkowitz, B., Scher, H. & Silliman, S. 2000. Anomalous transport in laboratory-scale, heterogeneous porous media. *Water Resour. Res.* **36**(1), 149-158.
- Delay, F., Porel, G. & de Marsily, G. 1997. Predicting solute transport in heterogenous media from results obtained in homogeneous ones: an experimental approach. *J. Contam. Hydrol.* **25**, 63-84.
- Haws, N. W., Das, B.S. & Rao, P. S. C., 2004. Dual-domain solute transfer and transport processes: evaluation in batch and transport experiments. *J. Contam. Hydrol.* **75**, 57-280.
- Kätterer, T., Schmied, B., Abbaspour, K. C. & Schulin, R., 2001. Single- and dual porosity modelling of multiple tracer transport through soil columns: effects of initial moisture and mode of application. *Eur. J. Soil Sci.* **52**, 25-36.
- Lewandowska, J., Szymkiewicz, A., Gorczewska, W. & Vauclin, M. 2005. Infiltration in a double-porosity medium: Experiments and comparison with a theoretical model. *Water Resour. Res.* **41**(2), 1-14.
- Lewandowska, J., Tran Ngoc, T. D., Vauclin, M. & Bertin, H. 2006. Water drainage in double - porosity soils: experiments & micro-macro modelling (soumis).
- Nützmann, G., Maciejewski, S. & Joswig, K. 2002. Estimation of water saturation dependence of dispersion in unsaturated porous media: experiments and modelling analysis. *Adv. Water Res.* **25**, 565-576.
- Padilla, I. Y., Jim Yeh, T.-C. & Conklin, M. H. 1999. The effect of water content on solute transport in unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* **35**(11), 3303-3313.